

étude de quelques déformations et transformations apparemment anormales de métaux

C. Crussard (), J. Bouvaist (**)*

INTRODUCTION

L'un de nous ayant été brutalement mis en face d'un cas de déformation d'éprouvette métallique sans intervention apparente d'une force extérieure (1), nous avons pensé qu'il était de notre devoir de chercheurs métallurgistes d'essayer d'étudier systématiquement ce genre de manifestations. Aussi nous sommes nous adressés à J.P. Girard, qui était réputé produire des effets « anormaux » sur les métaux et désirait expérimenter devant des scientifiques. Le présent article a pour but de décrire quelques-uns des essais que nous avons effectués avec lui depuis près de deux ans.

Quelques semaines après le début de nos essais, J.P. Girard nous avait prévenus qu'il avait pratiqué la prestidigitation. Quelques temps après, nous avons d'ailleurs appris de deux ou trois côtés à la fois qu'il était inscrit sur « l'annuaire des magiciens ». Au début, il opérait de façon un peu confuse et enveloppée, rappelant le style d'un illusionniste ; malgré cela, dès cette période initiale, J.P. Girard a produit des effets intéressants ; diverses personnalités scientifiques ont assisté à quelques-unes de ces démonstrations. Nous avons peu à peu obtenu que J.P. Girard simplifie sa manière d'agir et se prête à un protocole plus rigoureux. Mais nous avons observé sur nos enregistrements quelques gestes qui impliquaient une action musculaire.

Ce mélange d'effets frappants et d'éléments douteux nous a incités à une étude critique qui a été assez longue ; nous pensons intéressant d'en retracer ici les principales étapes.

Pour nous entourer d'avis variés, nous avons, dès août 1976, consigné l'ensemble de nos observations, de nos réflexions et de nos doutes dans un rapport provisoire qui a été distribué alors à de nombreuses personnalités scientifiques ; dans ce rapport, nous avons mentionné ce que nous savions sur J.P. Girard comme prestidigitateur et quelques-uns de nos doutes sur les « appuis » qu'il pouvait donner plus ou moins consciemment en cours d'essais. Nous avons complété ce rapport par des présentations de documents (éprouvettes, micrographies, diagrammes, enregistrements « video ») en faisant un échantillonnage des essais sûrs et d'autres moins bons, car il aurait été incorrect de présenter une sélection trop optimiste. Dans ces présentations, et pour élargir l'information sur J.P. Girard, nous avons aussi montré des films d'origines extérieures variées et d'ailleurs de valeurs inégales. Des illusionnistes, français et étrangers, ont assisté à certaines présentations ; ils nous ont aidés à préciser notre opinion sur certains endroits ; l'un d'eux a découvert un indice de truquage sur un film que J.P. Girard nous avait procuré sans nous dire qu'il était truqué. Les avis recueillis au cours de toutes ces discussions, nous ont aidés dans l'étude critique de nos documents, et dans diverses vérifications que nous avons faites depuis. J.P. Girard s'est prêté à quelques contre-essais, dont un au moins très intéressant (*). Tout ceci nous a pris du temps et explique le long délai entre nos pre-

(1) cf. Sciences et Avenir, n° 345 (novembre 1975), 1 108.

(*) Pechiney Ugine Kuhlmann, Paris.

(**) Centre de Recherches Aluminium Pechiney, Voireppe.

miers essais et la parution du présent article ; mais nous pensons que cette étude critique a été poussée assez loin, sinon presque trop loin, et que le moment est venu de publier les plus typiques de nos expériences.

La sélection que nous présentons résulte donc d'un long travail de criblage. Des 150 éprouvettes que J.P. Girard a déformées ou transformées devant nous ou nos collaborateurs, il n'y en a qu'une vingtaine où nous puissions affirmer de façon positive le caractère « anormal » des effets observés ; nous exposons dans la suite de cet article huit de ces cas, les plus typiques. Mais il faut dire que, parmi les essais éliminés, il y en a très certainement une majorité de valables, car nous avons pris un crible trop sévère en écartant des démonstrations qui ne suivaient pas un mode opératoire fixé d'avance. D'autres essais, avec jauges extensométriques, seront publiés ultérieurement.

Notre souci de rigueur élimine ainsi des observations assez remarquables, portant sur des déformations à distance, des déformations d'objets ou éprouvettes dans les mains mêmes d'observateurs au-dessus de tout soupçon, ou tenues à chaque bout par J.P. Girard et par un observateur.

Les essais que nous allons relater ont été conduits sous notre responsabilité personnelle, avec l'autorisation de Pechiney-Ugine-Kuhlmann. Nous tenons à remercier ceux de nos collaborateurs qui ont bien voulu nous aider dans l'étude délicate de ce domaine controversé, notamment MM. J. Rauch, G. Jollant et B. Dubost. Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance au Professeur J.B. Hasted, professeur de physique au Birkbeck College de l'Université de Londres, pour avoir bien voulu patronner un essai dans son laboratoire.

DESCRIPTION DES ESSAIS

Flexion d'éprouvettes métalliques

Pour éviter que J.P. Girard puisse plier subrepticement une éprouvette, nous avons utilisé souvent des barres d'assez forte section en métaux variés : surtout aluminium et alliages légers (barres de 250 à 350 mm de longueur et 8 à 17 mm de diamètre), mais aussi cuivre, acier doux, acier inoxydable, magnésium. Nous avons déterminé les forces (moments fléchissants) nécessaires à fléchir nos éprouvettes, par mesures et par calculs. Pour pouvoir comparer les valeurs de résistance des éprouvettes aux efforts qu'elles auraient pu subir s'il y avait eu truquage par flexion subreptice, nous avons déterminé le moment maximal qu'un homme peut développer en saisissant une barre à deux mains et en déployant toute sa force... ce qui ne passe pas inaperçu.

mométrique à poignées, de 400 mm de long, que nous avons fait essayer à de nombreuses personnes. Les moments maximaux varient, selon les individus, de 20 à 38 N.m ; la médiane est vers 25 N.m ; J.P. Girard a développé 26 N.m avec un effort très visible. Ces valeurs ont été confirmées par essais directs sur des barres ; on en verra un exemple ci-après (Séance du 27 octobre 1976).

Il ne saurait être question de décrire ici tous ces essais, ni d'en faire la revue critique ; nous avons choisi pour cet article les deux plus typiques :

Séance du 31 mars 1976,
au Centre Technique de l'Aluminium.

Expérimentateurs :

J. Rauch et G. Jollant, aidés d'un assistant pour l'enregistrement vidéo.

Au cours de cette séance, dans une pièce voisine de celle où était J.P. Girard, un expérimentateur, G. Jollant, a pris une barre de duralumin durci en alliage AU4G état T4 (c'est-à-dire trempé mûri) de 250 mm de long et 8 mm de diamètre ; son moment fléchissant critique assez élevé (15 N.m) empêche qu'on puisse la plier sans faire un effort visible. G. Jollant l'a fait rouler sur un bureau, a constaté qu'il n'y avait aucun faux rond, l'a marquée et mise lui-même dans un tube de verre qu'il a fermé avec un bouchon. C'est la seule fois où nous avons pu obtenir de J.P. Girard qu'il ne touche pas une éprouvette à fléchir avant qu'elle soit enfermée dans un tube.

G. Jollant a porté le tube fermé à J. Rauch, qui l'a donné immédiatement à J.P. Girard et, à partir de là, tout a été filmé. Le bouchon, ou la barre dans le tube, ou les deux, étaient toujours visibles. Après s'être concentré et avoir déclaré qu'il sentait quelque chose, J.P. Girard a confié le tube, toujours bouché, à J. Rauch. Celui-ci l'a débouché, a retiré la barre qui était visiblement fléchie, et l'a posée sur le bureau, puis sur une barre plate de façon à faire voir la flèche qui est ainsi rendue très visible. Cette flèche était de 2 mm.

Séance du 27 octobre 1976,
à Grenoble.

Expérimentateurs :

J. Bouvaist et B. Dubost.

Nous décrivons ici l'essai effectué sur la plus grosse barre. Il s'agissait d'une barre de 17 mm de diamètre et 300 mm de long, en alliage AU2 (à 2,05 % Cu) à l'état T4 (trempé à l'eau froide et mûri pendant 1 an) ; cette barre avait été munie de repères gravés dans la masse ; on avait noté l'emplacement de petits défauts caractéristiques ; elle avait été apportée sur les lieux de l'expérience dans une voiture autre que celle qui amenait J.P. Girard, et elle était seule de son espèce dans le lot expérimental.

Ce barreau avait préalablement fait l'objet de tests de flexion par des hommes très forts, et seul un homme de 140 kg avait pu obtenir, sur ce barreau, une déformation faible, mais significative, après s'être enduit les mains de magnésie (flèche de 0,6 mm correspondant à un moment appliqué de 38 N.m). Le plan de flexion avait alors été marqué par des gravages effectués sur les deux extrémités. Des essais ultérieurs avaient permis de vérifier que, même en s'aidant d'un appui fixe à mi-longueur, un homme moyen ne pouvait accentuer cette déformation en pesant de tout son poids (65 kg) sur les deux extrémités.

Au cours de l'essai, les deux expérimentateurs étaient assis de part et d'autre, à environ un mètre, de J.P. Girard qui opérait en bras de chemise, manches roulées, sans alliance. J.P. Girard réalisa successivement quatre déformations de ce barreau en tenant une extrémité dans sa main droite et en caressant doucement la partie libre de sa main gauche (flexions 1 et 2) ou en imposant celle-ci à 5 cm au-dessus de l'échantillon (flexions 3 et 4). Après chaque déformation, un observateur relevait le profil de l'éprouvette pendant que l'autre restait auprès de J.P. Girard. Les deux déformations les plus importantes (3 et 4) ont pu être suivies à l'œil ; elles se sont produites toutes deux vers le bas pendant une durée de l'ordre de 10 à 20 secondes ; on a vérifié, après chaque déformation, qu'aucun échauffement n'était détectable par toucher manuel de la barre, et que les flexions réalisées sans effort par J.P. Girard se faisaient toutes dans un même plan (incliné de 34° par rapport au plan de flexion initiale mentionné plus haut), repéré par les gravages indiqués plus haut ; ceux-ci permettaient d'ailleurs de vérifier à chaque instant qu'il s'agissait toujours bien du même barreau. Immédiatement après l'expérience, les échantillons ont été mis dans une valise et emmenés au laboratoire.

Décrivons maintenant les examens de laboratoire :

On a d'abord vérifié en laboratoire que tous les repères, gravages et défauts dont était initialement doté le barreau, étaient présents sur le barreau ramené de l'expérience, permettant d'affirmer, sans équivoque, qu'il n'y avait pas eu substitution d'échantillon. La figure 1 donne une image de la barre après l'expérience.

Les examens suivants ont eu pour but de caractériser, d'une manière non destructive, les modifications introduites dans le barreau, et ce plus particulièrement dans la section A correspondant au maximum de courbure. On note :

- un accroissement significatif de dureté des deux fibres situées dans le plan de flexion atteignant un maximum de 11 points Vickers (soit 27 %) dans la section A, correspondant à la courbure maximale. La longueur de la zone où la dureté est supérieure à la dureté initiale est d'environ 120 mm (60 mm de part et d'autre de la section A),

- dans la section A, perpendiculaire au plan de flexion, la dureté mesurée sur la circonférence est maximum dans le plan de flexion et varie linéairement avec la cote par rapport à la ligne neutre, comme dans le cas d'une flexion simple.

Afin de déterminer le moment qu'il faut appliquer par flexion mécanique au barreau pour obtenir la flèche permanente observée, nous avons procédé à la flexion mécanique d'un barreau témoin identique au précédent avec une distance entre appuis fixes de 200 mm. La variation de la flèche résiduelle mesurée en fonction du moment appliqué est donnée dans la figure 2. On peut ainsi déduire que, pour obtenir la flèche observée sur le barreau fléchi par J.P. Girard

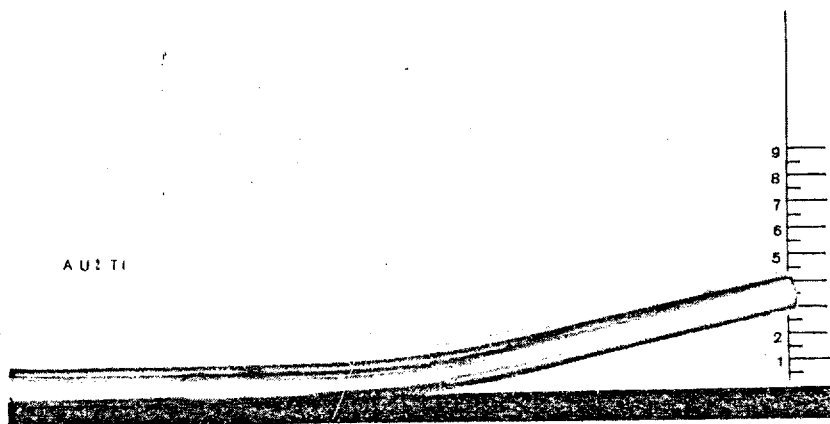


Figure 1. — Photographie de la barre en AU2 de 17 mm de diamètre, après flexion.

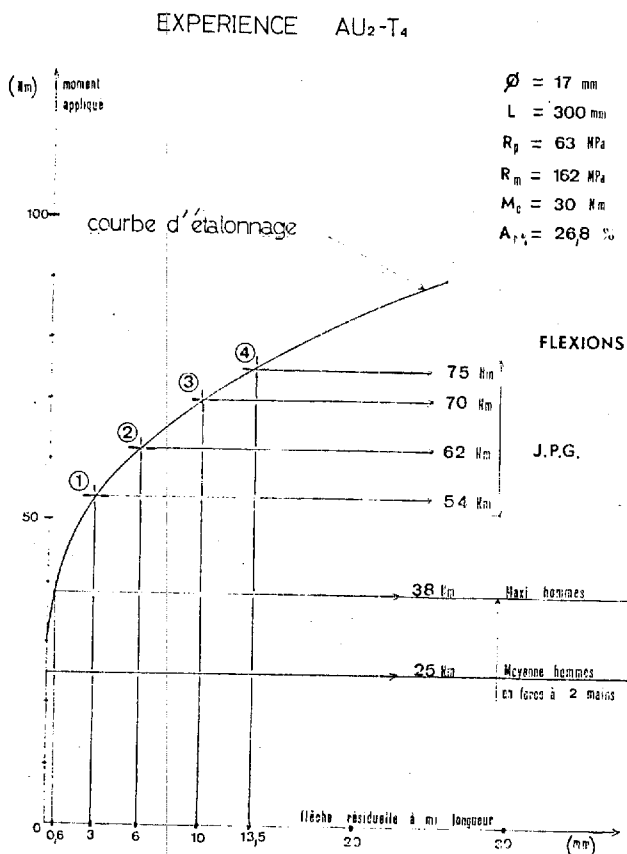


Figure 2. — Diagramme donnant la flèche en fonction du moment appliqué pour une barre témoin identique à celle de la figure 1.

($r = 13,5 \text{ mm}$), il faut appliquer un moment M d'environ 75 N.m , soit 2 fois et demie le moment critique $M_c = 30 \text{ N.m}$, et deux fois le moment exercé par l'homme le plus fort que nous ayons testé. L'énergie totale de déformation peut être calculée à 11 J .

Les résultats précédents permettent d'exclure complètement l'hypothèse de déformations subreptices d'origine musculaire qui auraient échappé à la vigilance des observateurs. Le fait que l'on observe une consolidation « normale » de la zone déformée permet d'exclure en outre l'utilisation subreptice de moyens thermiques ou chimiques ayant diminué localement la résistance mécanique de l'alliage.

En conclusion, l'ensemble des observations effectuées pendant et après l'expérience sur le barreau en duralumin déformé par J.P. Girard lors de l'expérience du 27 octobre 1976 permet de conclure :

— que les déformations successives réalisées n'ont pas été et n'auraient pas pu être produites par utilisation d'un moyen musculaire normal du sujet,

— que la déformation finale obtenue est en tous points comparable à celle que l'on obtiendrait en appliquant au milieu de la barre reposant sur deux appuis une force ponctuelle de 1500 N .

Essais en tubes fermés sur acier inoxydable

Matériaux et conditions opératoires

Au cours d'une séance au Centre Technique de l'Aluminium, le 25 mars 1976, devant trois expérimentateurs (C. Crussard, J. Rauch et G. Jollant) et quatre autres spectateurs, ont été observées des transformations martensitiques, avec ou sans déformation, d'éprouvettes provenant d'une coulée d'acier inoxydable austénitique de composition spéciale non commerciale, ayant servi antérieurement à une étude de la transformation martensitique par déformation ; cette coulée contenait essentiellement : $\text{Cr} = 17,8 \%$, $\text{Ni} = 7,4 \%$, $\text{Mn} = 1,56 \%$, $\text{Si} = 0,36 \%$, $\text{C} = 0,050 \%$, $\text{N} = 0,034 \%$.

Deux éprouvettes restant de cette étude ont été utilisées à cette fin ; il s'agissait d'éprouvettes à corps cylindrique (diamètre 7 mm et longueur 85 mm) et à têtes lisses de diamètre 12 mm . Ces éprouvettes avaient subi une trempe à l'air à 1050°C (1 h en bain de sel), un usinage de finition et une attaque fluonitrique, donnant au corps de l'éprouvette un aspect satiné. La structure résultante est amagnétique, à part quelques endroits de la couche superficielle d'usinage. Les points de transformation martensitique dans cet état sont : $M_s = -40^\circ\text{C}$ et $M_d = +90^\circ\text{C}$.

Ces deux éprouvettes avaient été confiées pour quelques jours à J.P. Girard. Au début de la séance, elles ont été marquées au crayon électrique de gros chiffres entourés d'un cercle irrégulier n° 2 et 3 ; une autre éprouvette, marquée de la même façon n° 1, a servi à un autre essai non significatif et sera reprise plus tard pour un contre-essai de simulation ; on voit sa marque sur la figure 5. C'était la première fois qu'on utilisait avec J.P. Girard des éprouvettes de ce genre et qu'on les marquait ainsi. Ce sont ces éprouvettes ainsi marquées qui ont été ramassées à la fin de l'essai dans les conditions que nous verrons : **il n'y a pas eu de possibilité de substitution.**

Après marquage, l'un de nous (C. Crussard) a vérifié la rectitude de ces éprouvettes n° 2 et 3 en les faisant rouler : aucun « faux rond ». Il a vérifié aussi leur état magnétique. A cet effet, une méthode rapide et simple pour évaluer de point en point le magnétisme consiste à utiliser un petit aimant puissant, en fer à cheval, en Ticonal 1500 (surfaces polaires $7 \times 4 \text{ mm}^2$, distantes de $8,5 \text{ mm}$) suspendu au bout d'une chaînette. Pour faire la mesure, on part d'une position où l'aimant est au contact de l'éprouvette, la suspension étant verticale, on fait tourner progressivement l'éprouvette jusqu'à ce que l'aimant décolle.

Mesurant la distance horizontale de l'aimant à l'éprouvette à ce point, D, connaissant la masse de l'aimant (22 gr) et la longueur de la suspension, on peut calculer la force d'arrachement F. Au cours de cette vérification, sur le milieu des deux éprouvettes et sur les têtes, la distance D définie ci-dessus n'a pas dépassé 2 à 3 mm, ce qui correspond à des forces d'arrachement F de l'ordre de 0,01 N, dues à quelques traces de martensite superficielle produite par l'usinage.

Après cette vérification, les éprouvettes sont mises sur le bureau derrière lequel opère J.P. Girard (en manches de chemise retroussées) dans le champ de la caméra vidéo qui ne les quitte pas (pendant que J.P. Girard dispose d'autres éprouvettes et fait une tentative sur un barreau d'alliage léger, sans quitter son siège) jusqu'au moment où débutent les expériences suivantes :

a) J.P. Girard prend l'éprouvette n° 2 délicatement par une tête et sans exercer d'effort (le film permet de l'affirmer), la met dans un tube, le bouche avec un bouchon (toujours devant la caméra), prend le tube bouché à pleine main (main gauche, le bouchon restant toujours visible), et se concentre. Il donne ensuite le tube à C. Crussard et, à partir de ce moment, ne touchera plus à l'éprouvette.

C. Crussard retire l'éprouvette du tube : elle a une flexion faible mais nette près d'une extrémité, visible à l'œil, et qu'on vérifie en la faisant rouler ; la vérification à l'aimant indique, près de cette même extrémité, un fort magnétisme local (voir tabl. I). Toute l'opération ayant été filmée, il ne peut y avoir de substitution. C. Crussard remet l'éprouvette dans sa boîte pour étude ultérieure ;

b) J.P. Girard prend l'éprouvette n° 3, qui est restée toujours visible. Mêmes opérations que pour le n° 2, à cela près qu'un spectateur, à un moment, occulte la caméra. Après que J.P. Girard se soit concentré, C. Crussard reprend le tube bouché, en retire l'éprouvette et la fait rouler. Celle-ci est restée droite, et pourtant elle présente un magnétisme local analogue à celui de l'éprouvette n° 2, mais cette fois sans déformation. Elle est remise en boîte, pour étude également.

Premières mesures

Le lendemain, C. Crussard évalue le magnétisme et les déformations. Pour le magnétisme, c'est toujours le même aimant qui est utilisé ; les forces d'arrachement F définies plus haut sont indiquées dans le tableau I (à 0,01 N près environ). Pour les déformations, ou flèches Y, on applique une des têtes contre une règle et on mesure la distance entre l'autre tête (côté intérieur) et la règle. Au début de l'essai on a vérifié que les éprouvettes « tournaient rond ».

Sur la figure 3, on voit très bien l'inflexion près d'une tête.

TABLEAU I :

Mesure	Eprouvette n° 2	Eprouvette n° 3
Flèche d'un côté y 1 (mm).	2,5	< 0,3
Flèche de l'autre côté y 2	1,7	< 0,3
Flèche moyenne $y = \frac{y_1 + y_2}{2}$	2,1	< 0,3
Force d'arrachement f de l'aimant (N) :		
— une tête	0,12 (*)	0,03
— extrémité du fût cylindrique	0,15	≥ 0,22
— milieu	0,02	0,03
— autre extrémité du fût cylindrique	0,02	0,02
— autre tête	0,05	0,01

(*) Valeur maximale.

Examens en laboratoire

Des examens divers, d'ailleurs destructifs, ont été faits sur l'éprouvette n° 2. Le barreau a été scié électrolytiquement au ras de la tête magnétique. On a pu ainsi introduire l'extrémité magnétique de la partie cylindrique du barreau dans la bobine d'un appareil Sigmatest : l'aimantation spécifique à saturation est de 2,8, correspondant à une proportion de 1,9 % de phase magnétique (α').

Pour l'éprouvette n° 3, une étude non destructive aux rayons X a révélé dans la zone magnétique, outre l'austénite, des martensites α' et ϵ , celle-ci en forte proportion.

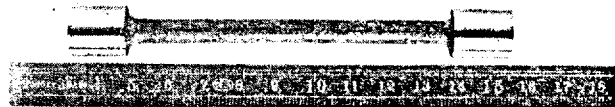


Figure 3. — Photographie de l'éprouvette d'acier inoxydable n° 2, après l'expérience.

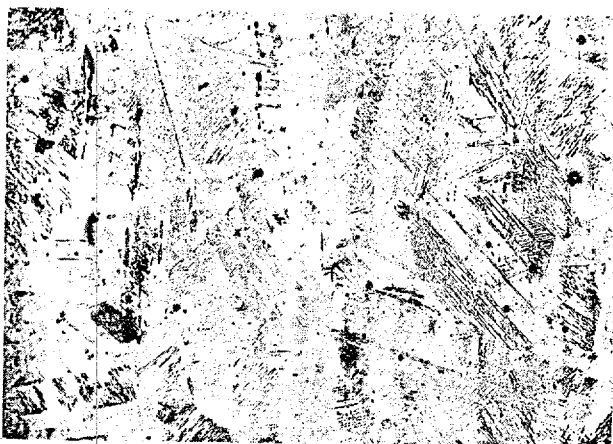


Figure 4. — Micrographie de la zone localement transformée de l'éprouvette d'acier inoxydable n° 2 : (a) près de la surface, (b) à cœur.

Les micrographies (éprouvette n° 2) sur surface polie mécaniquement puis électrolytiquement (fig. 4 a et 4 b) révèlent un mélange de martensites ϵ et α' . Par comparaison avec les études antérieures faites sur cet acier, on peut affirmer que ces structures n'ont ni le faciès d'une martensite obtenue par refroidissement, ni celui d'une martensite produite par désensibilisation de l'austénite en la chauffant. Ce ne peut être qu'une martensite de déformation (avec quelques traces de martensite due à la préparation de la surface polie). La densité de martensite semble assez uniforme sur toute la section : malgré l'incertitude qui découle toujours en micrographie du choix des champs, les figures 4 a et 4 b montrent des aspects comparables à surface et à cœur. La quantité de martensite observée sur ces micrographies correspond à celles que l'on obtient sur cet acier par des déformations de traction de 5 à 10 % ; elle est donc beaucoup plus forte que ce qui correspondrait à la faible flexion observée (fig. 3). Sa localisation est très surprenante.

Essais de simulation

Le magnétisme local de la tête de l'éprouvette n° 2 n'a pu échapper à la vérification faite au début de l'essai et qui portait notamment sur les têtes.

Néanmoins, deux assurances valant mieux qu'une, nous nous sommes donc demandé si nous pouvions imaginer un processus métallurgique capable de produire ces martensites localisées, tout en laissant les éprouvettes bien droites ou seulement légèrement fléchies.

Comme il s'agit de martensite d'écroissage, il faut opérer par déformation. La manière la plus approchée pour reproduire sa localisation près d'une tête, avec cette abondance, est la flexion alternée. Nous avons fait des essais sur une autre éprouvette, n° 1, non magnétique au départ ; il faut coincer une tête dans un étau, fléchir d'environ 30° et redresser. Mais alors, à cause des propriétés spéciales de cet acier, l'éprouvette se met en S de façon très visible (fig. 5). Pour la remettre droite, il faudrait usiner une matrice en forme et recomprimer l'éprouvette à la presse ! Autre différence : sur l'éprouvette n° 1 ainsi traitée, le magnétisme de l'extrémité du fût est comparable à celui de l'éprouvette n° 2, mais la tête n'est pas magnétique, ce qui est évidemment normal.

Un examen micrographique pratiqué sur une autre éprouvette fléchie encore plus fortement et redressée révèle de la martensite d'écroissage, mais avec une répartition hétérogène très nette : la densité de martensite est plus faible à cœur qu'à la surface (fig. 6 a et 6 b), ce qui est normal, mais constitue une différence avec l'éprouvette n° 2. Pour avoir une densité uniforme dans la section, et de l'importance observée, il faudrait pouvoir exercer une déformation du genre traction localisée dans l'extrémité du fût et dans la tête (de l'ordre de 5 à 10 % pour l'éprouvette n° 2, et au moins 10 % pour l'éprouvette n° 3), mais qui ne change pas sensiblement les diamètres

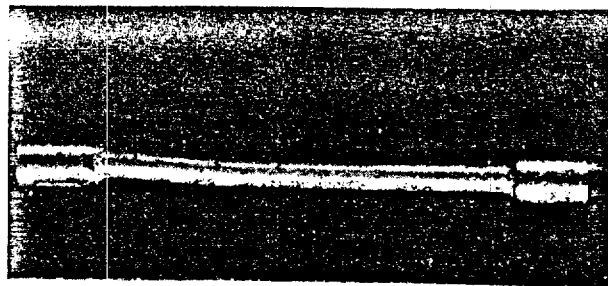


Figure 5. — Eprouvette d'acier inoxydable n° 1 après un essai de simulation.

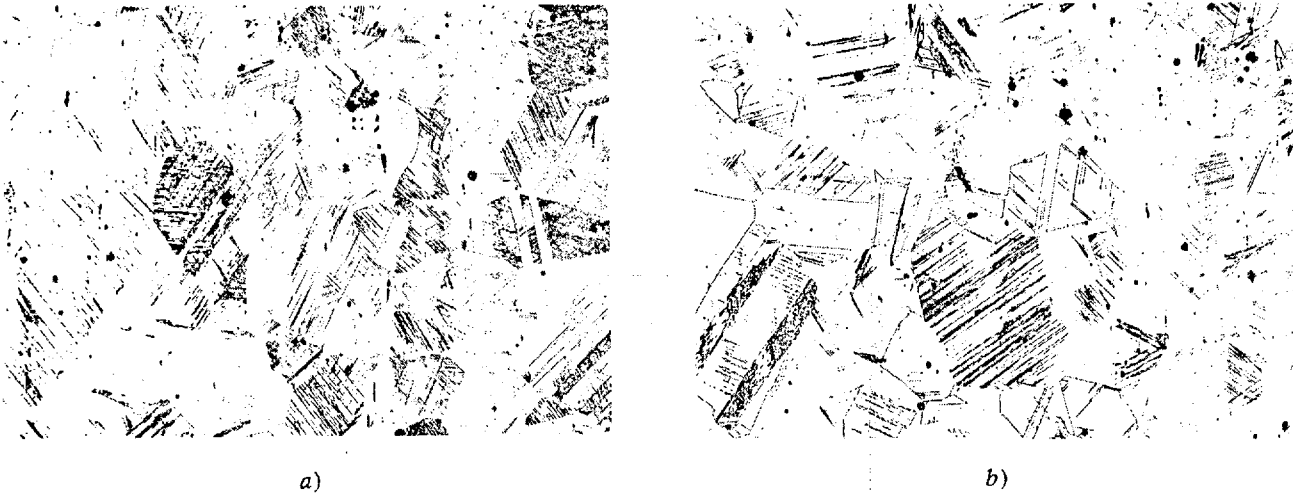


Figure 6. — Micrographies semblables à celles de la figure 4, mais pour une éprouvette ayant subi un essai de simulation : (a) près de la surface, (b) à cœur.

du fût ni de la tête (*). Il faudrait une succession de rétreints et de pétrissages, tout ceci sans laisser de trace sur l'éprouvette !

Conclusion

L'ensemble des observations décrites ci-dessus permet de constater :

— qu'une transformation martensitique locale a été réalisée au cours de l'essai sur deux éprouvettes, accompagnée sur l'une d'elles d'une petite flexion près d'une tête,

— que nous n'avons pu imaginer aucune opération métallurgique simple capable de reproduire exactement les structures observées dans les zones transformées.

Modifications locales de dureté de plaquettes métalliques

Cette expérience a été effectuée à quatre reprises par J.P. Girard en des lieux et devant des observateurs différents. Lors de la première séance (27.10.1976), l'un des expérimentateurs lui proposa, à l'improviste, un essai d'un type nouveau : durcir une plaquette métallique en essayant de « compacter » le métal. Le protocole expérimental retenu pour cet essai et repris pour les trois autres, à quelques

détails près qui seront mentionnés, était le suivant : on soumet à J.P. Girard une plaquette en duralumin de dimensions, de composition et de repère connus du seul expérimentateur (et différents pour chaque nouvelle expérience). Dans un premier temps, J.P. Girard prend contact avec l'éprouvette en la frottant ou la caressant avec les doigts sous contrôle rapproché des expérimentateurs. L'éprouvette est ensuite placée par l'expérimentateur dans un tube de verre bouché après vérification de la rectitude et du repère. Le tube est alors redonné à J.P. Girard pour essai. L'éprouvette reste dans le tube jusqu'à l'examen en laboratoire. Pour l'essai 4, la phase en tube de verre fut supprimée, car elle n'apportait aucune garantie supplémentaire par rapport au protocole initial qui acceptait un contact manuel pendant la phase initiale.

Matériaux d'essai et conditions opératoires

Les quatre plaquettes modifiées étaient toutes en duralumin à l'état T351 (trempe à 505°C dans l'eau froide, traction de détensionnement de 1,2 à 2 %, maturation d'au moins 48 h). Deux compositions furent utilisées (une d'alliage quaternaire A-U4SG de composition non commerciale, et une en alliage 2017 industriel). Un symbole anonyme gravé au fer sur le métal et différent à chaque expérience permettait aux observateurs d'identifier sans équivoque la plaquette d'essai d'un simple coup d'œil. Chaque plaquette était issue d'un lot de plaquettes identiques ayant subi le même traitement et les plaquettes témoins de chaque lot étaient conservées en laboratoire pour comparaison et essais de simulation ultérieurs.

(*) Dans le cas de l'éprouvette n° 3, on a mesuré une très légère diminution de section (0,5 %) dans la zone devenue magnétique. Notons qu'on pouvait aussi songer à une simulation par torsion ; mais on ne voit pas comment réaliser ainsi une déformation localisée près d'une tête et dans celle-ci.

TABLEAU II :

Essai	Date	Lieu	Observateurs	Caractéristiques initiales de l'échantillon		Nature
				Dimensions	Repère	
1	27.10.76	Grenoble	J.B. et B.D.	16 × 2,5 × 150	11 - I	A-U4SG-T351
2	25.11.76	Lyon	J.B., P.G. et J.G.	14 × 2,4 × 160	11 - J	A-U4SG-T351
3	25.11.76	Lyon	J.B., P.G. et J.G.	14 × 2,6 × 160	11 - H	A-U4SG-T351 + billage
4	10.10.77	Londres	J.B. et J.H.	12 × 3,0 × 160	VG	A-U4G-T351 usinée + brillatée

Observations durant l'expérience

PREMIER ESSAI :

Pendant la phase de prise de contact du bout des doigts (~ 2 mn), on observa successivement deux légères flexions de la plaquette 11-I, en sens inverse l'une de l'autre, de flèches respectives (+ 1 mm) et (- 0,5 mm). L'éprouvette fut alors mise en tube de verre avec une flèche résiduelle totale de + 0,5 mm (la fibre légèrement convexe correspondait à la face gravée). Le tube fut alors donné à deux reprises à J.P. Girard (5 mn).

DEUXIEME ESSAI :

Aucune flexion avant la mise sous tube. Durée de l'exposition : 3 mn.

TROISIEME ESSAI :

L'éprouvette 11-H avait été grenillée au préalable sur toute la longueur des 2 faces, pour voir si un durcissement supplémentaire local était faisable. Durée : environ 3 mn, sans déformation.

QUATRIEME ESSAI :

L'éprouvette VG est essayée à deux reprises par J.P. Girard (durée de l'exposition : 2 fois 2 mn).

Examens en laboratoire

Pour les quatre essais, les examens comparatifs des repères gravés, dimensions, poids, empreintes de dureté initiales des éprouvettes, ont confirmé que les éprouvettes rendues au laboratoire étaient bien celles qui avaient été préparées pour les expériences.

DURETE :

Après polissage électrolytique, la mesure de dureté au microduromètre Vickers sous charge de 3 kg (~ 30 N) fut effectuée sur les deux faces des éprouvettes soumises à expérience, ainsi que sur les éprouvettes témoins conservées en laboratoire. Les empreintes furent effectuées avec un pas de 1 à 2 mm (selon les cas). Des contre-mesures pratiquées en double aveugle par des opérateurs différents (pour les essais 2 et 4) conduisirent à des résultats équivalents.

Les résultats obtenus par cette technique, dont deux cas sont représentés sur les figures 7 et 8, permettent de mettre en évidence des accroissements notables et simultanés de dureté sur les deux faces opposées. Les longueurs des zones modifiées et les accroissements maximaux de dureté sont regroupés dans le tableau III. Compte tenu de la dispersion (caractérisée par l'écart-type indiqué entre parenthèses à l'avant-dernière colonne), ces observations montrent de façon complètement significative qu'il y a eu modification du métal lors des quatre essais.

On voit que les durcissements maximaux observés vont de 6 % (essai 4) à 12 % (essai 2) et sont en moyenne de 8 %. Lors de l'essai 4, on avait effectué avant l'expérience six empreintes Vickers à mi-longueur parce que dans les essais précédents, le durcissement avait toujours eu lieu dans cette zone, donnant des duretés de 1200 à 1210, ce qui permet d'éliminer complètement l'hypothèse d'une hétérogénéité de dureté préexistante ; notons, en passant, que cet essai est particulièrement intéressant parce qu'il a été exécuté en Angleterre, chez le Professeur J. Hasted, et que les duretés ont été remesurées « en aveugle » et confirmées dans le laboratoire anglais dépendant de l'Electrical Research Association.

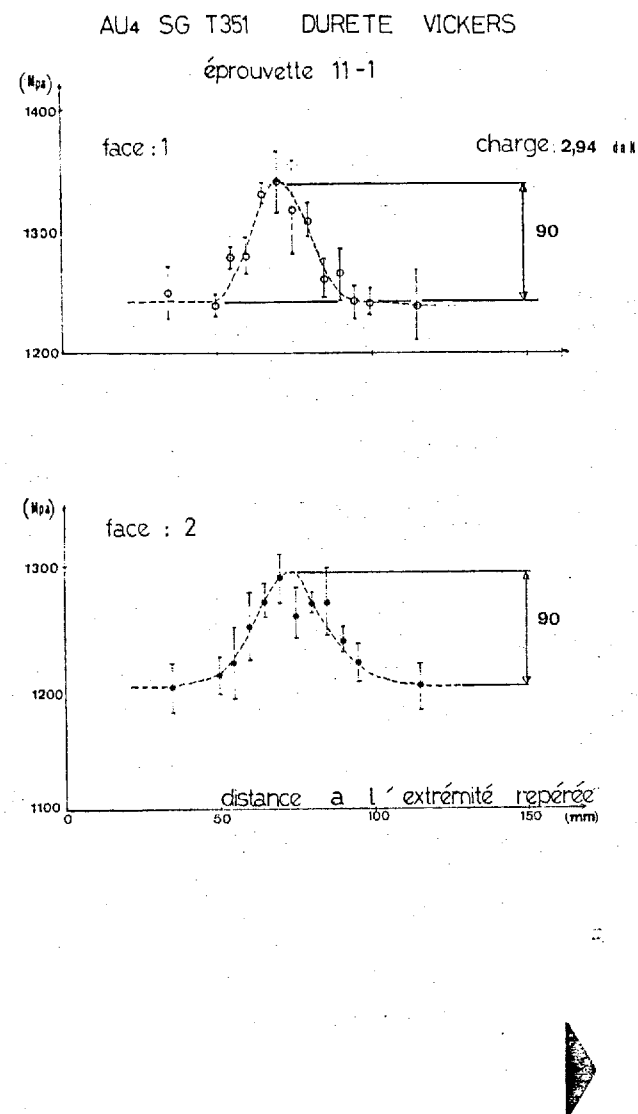


Figure 7. — Duretés mesurées sur les deux faces de l'éprouvette d'alliage léger 11-I, après essai.

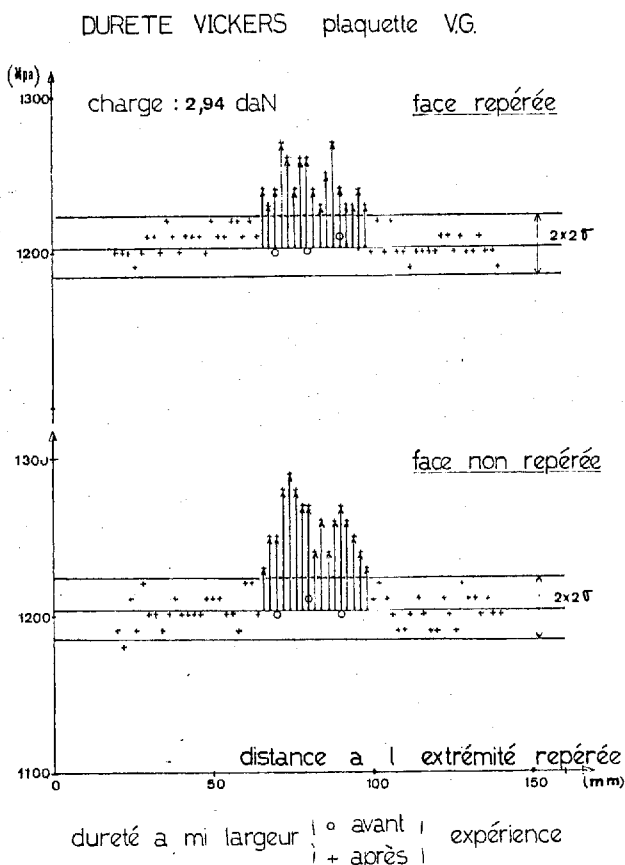


Figure 8. — Dureté mesurée sur les deux faces de l'éprouvette d'alliage léger VG, avant et après essai.

TABLEAU III :

Essai	Eprouvette	Dureté maximum dans la zone modifiée (MPa)	Dureté initiale		Longueur significativement modifiée (mm)
			Extrémité plaque	Témoin (écart-type)	
1	11 - I	Face 1 1340	1240	1220 (15)	20
		Face 2 (R) 1290	1200	1230 (14)	30
2	11 - J	Face 1 1340	1180	1180 (20)	20
		Face 2 (R) 1310	1190	1200 (21)	20
3	11 - H	Face 1 1420	1290		20
		Face 2 (R) 1380	1260		15
4	VG	Face 1 (R) 1270	1200 (7)	1210 (15)	35
		Face 2 1290	1200 (9)	1200 (10)	35

CONTRAINTES INTERNES :

Deux techniques ont été utilisées afin de mettre en évidence d'éventuelles différences de contraintes résiduelles longitudinales des zones modifiées. La technique de mesure superficielle par diffraction X (méthode en $\sin^2 \psi$) utilisée sur l'éprouvette 11-I indique une modification importante de la contrainte résiduelle longitudinale sur les deux faces opposées de la zone modifiée : on observe, en effet, une contrainte résiduelle de -80 MPa sur la face non marquée (légèrement concave) et de $+80$ MPa sur la fibre opposée (marquée). Sur les extrémités non modifiées, on retrouve l'état de contrainte initial normal pour cet état métallurgique (T351), soit $\sigma_R \approx -15$ MPa.

Ce point a été confirmé en mesurant sur l'éprouvette 11-J les déformations relatives créées sur la face 2 lors de l'usinage chimique progressif de toute la face opposée (1). On observe, par cette technique (dite de Rosenthal-Norton) une variation importante et significative de la jauge située à l'aplomb de la zone modifiée, alors qu'une jauge située sur la même fibre, à 25 mm de la zone modifiée, a un comportement normal semblable à celui des deux jauges situées sur le témoin. On peut donc conclure, sans ambiguïté, que la modification locale de dureté est associée à une modification locale de l'état de contrainte résiduelle de cette zone.

MICROSTRUCTURE :

Les éprouvettes modifiées lors des essais 1 et 2 et les témoins correspondants, ont fait l'objet d'examen au microscope électronique en transmission (100 kV). Des lames minces parallèles à la surface et amincies avec soin pour éviter toute déformation ont été prélevées à mi-épaisseur et sur les deux faces opposées de la zone modifiée de l'éprouvette 11-I, ainsi que sur la zone superficielle modifiée (face 2) de l'éprouvette 11-J.

Dans les deux cas, on observe que les zones modifiées présentent une microstructure caractéristique comportant une densité très importante de petites boucles de dislocation d'environ 200 angströms de diamètre (fig. 9 a et 10, a et b). A mi-épaisseur, on trouve une densité de boucles plus faible, mais significativement plus forte que dans le métal initial prélevé en bout d'éprouvette (fig. 9 b) et sur un témoin.

Dans le cas de l'échantillon 11-I, on a effectué un comptage comparatif des boucles visibles dans la coupe (110) avec : $g = [111]$ $s > 0$; après avoir mesuré les épaisseurs respectives des différentes lames, on trouve les résultats donnés au tableau IV (moyenne de 5 champs).

En résumé, on observe que les modifications produites par J.P. Girard sur les plaquettes en durallumin qui lui ont été soumises, entraînent simultanément :

— un durcissement superficiel de l'ordre de 8 % localisé sur les deux faces des plaquettes, sur une longueur pouvant atteindre 40 mm et une largeur de 10 à 15 mm,

— la modification des contraintes résiduelles superficielles dans la zone modifiée,

— la création, dans cette zone, d'une microstructure particulière comportant une densité très élevée de petites boucles de dislocation (\varnothing 200 angströms),

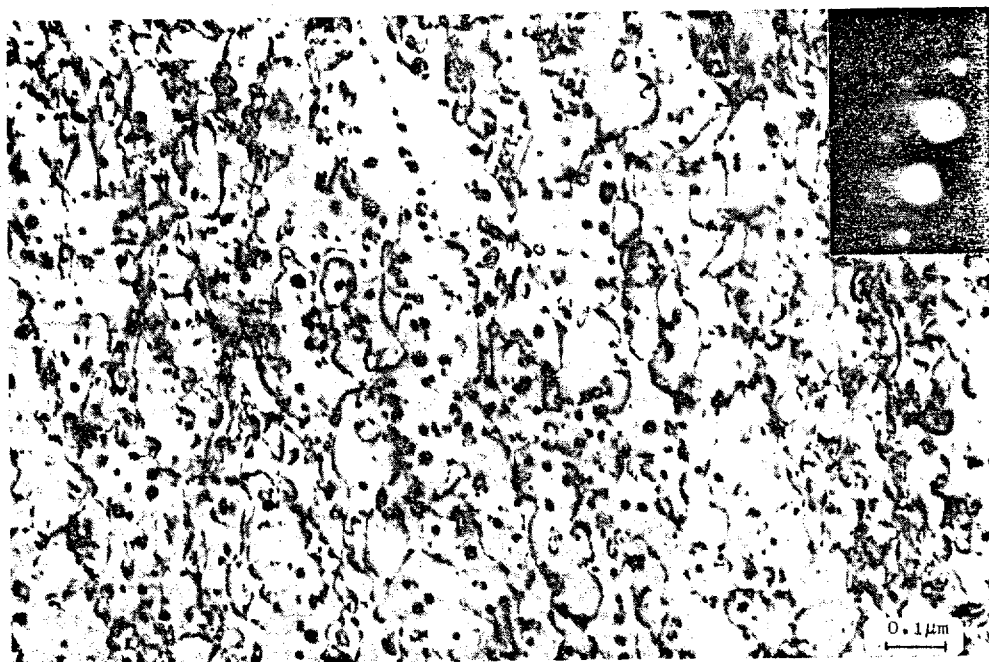
— l'absence de déformation macroscopique de flexion (sauf pour l'essai 1 — voir plus haut).

Essais de simulation

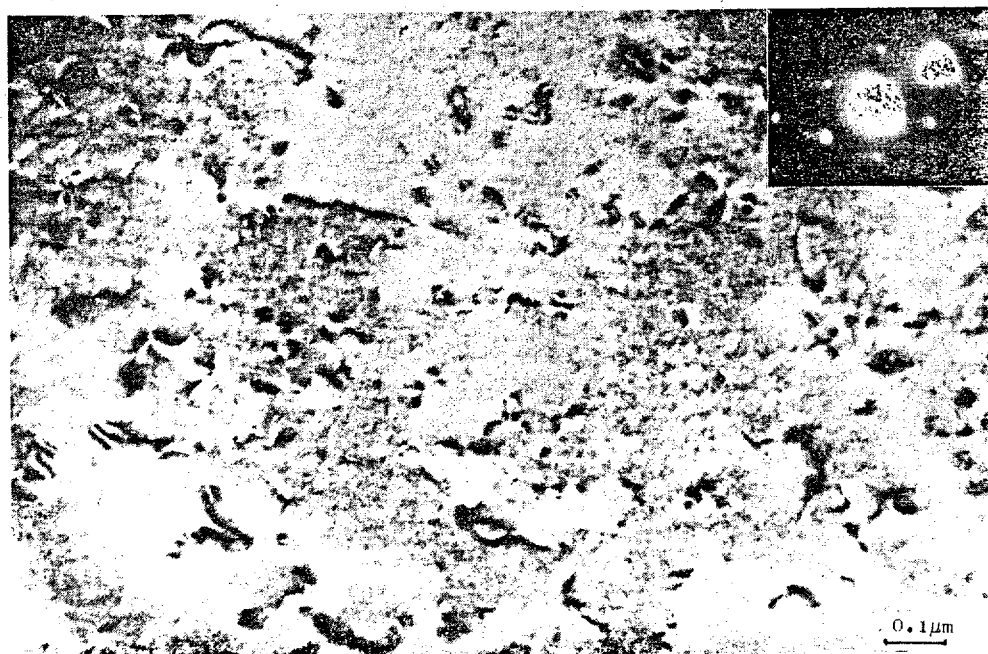
Comme dans le cas de l'acier inoxydable, nous avons cherché une double assurance en essayant d'imaginer par quels moyens simples de déformation on pouvait simuler les états précédents.

TABLEAU IV :

Prélèvement		Densité de boucles visibles (cm^{-3})	Densité relative par rapport au témoin
11-I (témoin)	HV = 1240	$7,4 \cdot 10^{13}$	1
11-I zone modifiée	face 1 HV = 1340	$130 \cdot 10^{13}$	18
11-I zone modifiée	face 2 HV = 1290	$84 \cdot 10^{13}$	11
11-I mi-épaisseur		$61 \cdot 10^{13}$	8



a)



b)

Figure 9. — Micrographies électroniques en lame mince et diagrammes de diffraction électronique de l'éprouvette d'alliage léger 11-I : (a) zone superficielle durcie ; (b) partie non modifiée. Conditions de contraste identiques dans les deux cas.

Notons d'abord que les micrographies électroniques montrent que les zones de Guinier-Preston ne sont pas dissoutes et sont les mêmes à la fin de l'essai qu'à l'état original. Ceci exclut toute simulation par traitement thermique, notamment par chauffage superficiel (induction ou rayonnement optique). Nous sommes ainsi amenés à envisager des essais de simulation mécanique.

FLEXION ALTERNÉE

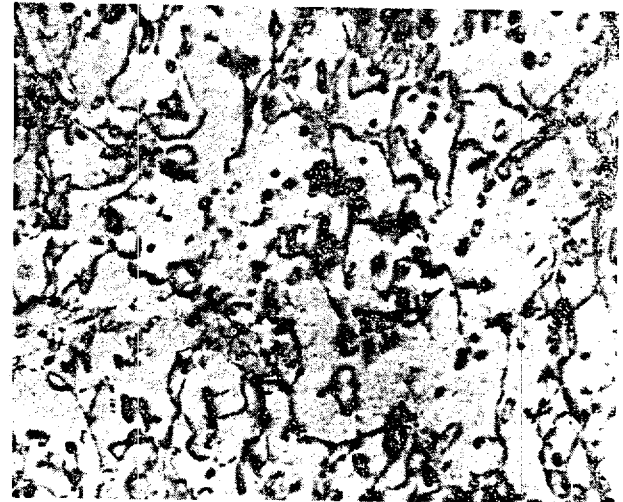
Compte tenu du fait que le contact manuel était autorisé pendant la première phase de l'expérience, on pouvait se demander si une opération subreptice de flexion alternée dans le domaine plastique n'était pas suffisante pour conduire aux modifications observées.

Des essais de flexion alternée effectués sur des témoins ont permis de voir qu'il fallait introduire une déformation plastique totale d'au moins 5 % par flexion alternée pour obtenir un durcissement de l'ordre de celui qui avait été observé précédemment ($\sim 3\%$). Ceci nécessite de plier très fortement l'éprouvette jusqu'à atteindre un rayon de courbure de 50 mm (ce qui correspond à une flèche de l'ordre de 30 mm, incompatible avec les observations faites), puis de la redresser par une flexion en sens inverse.

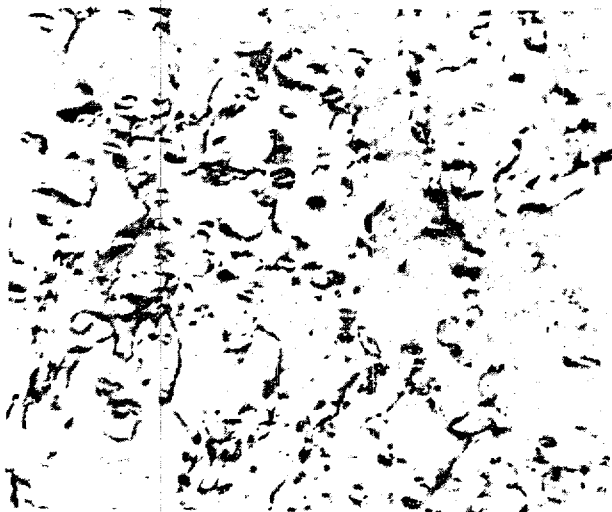
Cette simulation ne permet cependant pas de reproduire l'état structural observé sur les éprouvettes modifiées par J.P. Girard. On observe alors, en effet, dans les zones durcies, par microscopie électronique, des écheveaux de dislocations mais pas d'accroissement significatif du nombre de boucles de dislocation.



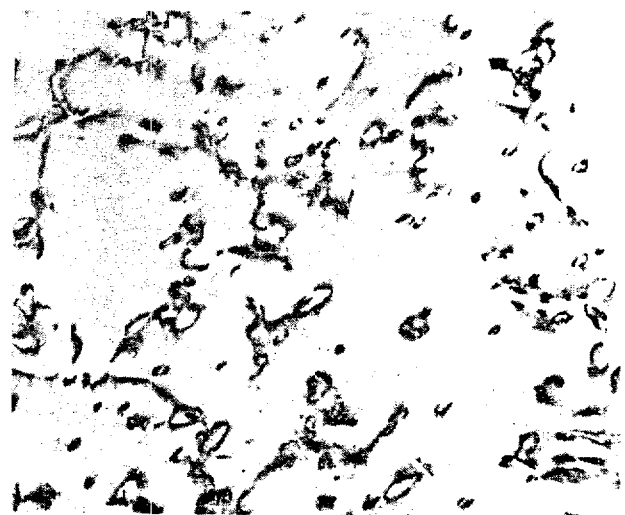
a) Epreuve 11-I, essai avec J.P. Girard, face 1.



b) Epreuve 11-I, essai avec J.P. Girard, face 2.



c) Epreuve de simulation par grenailage.



d) Epreuve de simulation par compression à la presse.

Figure 10. — Micrographies électroniques, au grandissement $64\ 500\times$ (avant réduction).

ESSAI DE COMPRESSION A LA PRESSE

Un essai de compression local à la presse de la plaquette témoin 11-U sous 300 MPa ($\sigma_e \approx 220$ MPa), a permis d'obtenir un durcissement des surfaces respectivement en contact avec le poinçon et la table, voisin de celui qui était recherché ($\Delta HV = 140$ MPa), avec une microstructure analogue à celle qui était observée sur les éprouvettes modifiées (fig. 10 d), mais avec une moindre densité de boucles. On observe cependant une diminution d'épaisseur de 13 % et une modification uniforme dans la section de la structure et de la dureté, ce qui n'est pas le cas pour les éprouvettes « durcies » par J.P. Girard; des mesures d'épaisseur de la plaquette 11-J révélaient cependant une réduction d'épaisseur de l'ordre de 2 % à l'aplomb de la zone modifiée.

ESSAI DE GRENAILLAGE (shot-peening)

Un essai de grenaillage superficiel des deux faces opposées du témoin (11-M) (*) a permis de simuler l'essentiel des points que l'on cherchait à reproduire: durcissement superficiel ΔHV de 70 MPa, absence de flexion permanente, microstructure analogue (hétérogène dans l'épaisseur avec une densité maximum de boucles de dislocation au voisinage des surfaces). On obtient cependant par ce moyen une surface dépolie d'aspect très différent de celui des éprouvettes modifiées par J.P. Girard et il faut effectuer un polissage supplémentaire pour restaurer un état de surface comparable.

L'ensemble des observations et simulations effectuées montrent qu'il faudrait effectuer un effort de compression des plaquettes normale à la surface créant une déformation plastique hétérogène dans la section pour reproduire l'essentiel des particularités physiques observées sur les plaquettes métalliques localement et superficiellement durcies par J.P. Girard. L'énergie mécanique requise pour simuler une telle modification peut être estimée d'après l'essai de simulation par compression: on trouve 1,6 J.

On peut aussi produire des boucles de ce genre par irradiation neutronique.

Conclusion

L'ensemble des observations effectuées sur les plaquettes de duralumin soumises à J.P. Girard, permet de constater:

— que le durcissement demandé a bien été réalisé à quatre reprises pendant l'essai,

— qu'aucune opération métallurgique simple connue des auteurs ne permet de reproduire exactement les différentes particularités physiques observées dans les zones localement durcies.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Nous avons décrit dans cet article un certain nombre de déformations et transformations de métaux obtenues dans des conditions particulières. Les lieux où se sont produits ces essais et les personnes qui les ont observés ont été variés; la seule présence constante, commune à tous ces essais, a été celle de J.P. Girard lui-même: il y a donc eu corrélation entre sa présence et l'apparition des effets particuliers observés. Il semble donc qu'on ait le droit de dire que J.P. Girard fait partie de la « cause » de ces effets. Mais, pendant ces déformations ou transformations, nous n'avons observé ni enregistré de sa part aucune intervention de forces musculaires ou d'effets physiques capables de les produire.

Il semble donc qu'on puisse conclure au caractère « anormal » de ces effets, surtout si l'on tient compte des observations suivantes:

— pour une des éprouvettes déformées (voir « séance du 27 octobre 1976 »), les précautions prises pour son repérage et le suivi de la déformation par tracés de profils successifs sont de nature à prouver qu'il n'y a pas eu substitution; la résistance très élevée de cette éprouvette nous semble suffisante pour exclure toute explication par une action purement manuelle et musculaire,

— pour l'autre éprouvette déformée en tube de verre (Séance du 31 mars 1976), le mode opératoire décrit semble établir que la déformation, bien que faible, est assez nette et s'est faite alors que l'éprouvette était dans le tube,

— pour les cas de transformation locale de structure, par transformation martensitique (§ « Essais en tubes fermés sur acier inoxydable ») ou par création de nombreuses petites boucles de dislocations (§ « Modifications locales... métalliques », les précautions décrites montrent qu'il n'y a pas eu substitution. La production de ces effets en tube ou avec contact léger exclut toute explication « normale ». Même s'il y avait eu substitution, il faut noter l'impossibilité où nous avons été de reproduire l'ensemble des particularités physiques des pièces ainsi transformées, ni d'imaginer aucune opération métallurgique simple capable de le faire. Nos essais de simulation ont, en effet, permis de reproduire les éléments structuraux nouveaux produits au cours des essais faits avec un poinçon.

(*) Conditions opératoires: machine Matrasur, pression air: 7 bars — débit 0,85 m³/mm billes de verre (\varnothing 75 à 110 μ m, dureté 11 HRC).

en combinant plusieurs de ces actions de simulation de façon complexe (actions qui auraient d'ailleurs laissé des traces sur l'éprouvette), on arriverait peut-être à simuler la texture locale et la disposition de ces éléments structuraux, mais on produirait des variations de dimensions beaucoup plus fortes que celles observées, qui sont très faibles ou nulles. Le caractère localisé de ces transformations est surprenant.

Ces expériences font partie d'un ensemble d'essais beaucoup plus nombreux, que nous avons passés au crible et soumis à une longue étude critique dans les conditions décrites dans l'introduction. Dans cet ensemble, nous avons d'ailleurs eu des essais où il ne s'est rien passé, et d'autres où nous avons nettement observé des impulsions musculaires, à côté d'effets positivement « anormaux ».

Il est bon de souligner que les effets observés ont une certaine reproductibilité : les flexions de barres ont été produites de nombreuses fois, les transformations martensitiques locales deux fois, et les durcissements locaux quatre. Le dernier de ces quatre essais, celui fait chez le Professeur Hasted, est le plus significatif, parce qu'il comporte une mesure de dureté avant essai dans la

zone où se produit ensuite le durcissement, et parce que l'augmentation de dureté a été vérifiée dans deux laboratoires indépendants, dont un laboratoire anglais opérant « en aveugle ».

Dans aucun de ces essais, J.P. Girard n'a produit de structures inconnues. Les modifications de structure observées sont du type de celles produites par certains genres de déformations. Leur répartition est normale dans les cas de flexion simple, mais anormale dans les transformations sans déformation ou avec déformation faible.

Si ces effets avaient été produits par application de forces, le travail à dépenser dans le cas de l'éprouvette la plus grosse aurait atteint environ 12 J. L'augmentation d'enthalpie correspondante serait de 2 à 3 J.

Dans cet article, nous n'avons nullement l'intention d'imposer nos conclusions comme des vérités scientifiques complètes. Mais nous avons cru de notre devoir d'exposer objectivement les conditions et les résultats de ces expériences. Nous n'avons trouvé d'explication aux effets observés, ni dans la physique actuelle, ni dans les truquages possibles : mais d'autres sauront peut-être en imaginer.

A PROPOS DE L'ARTICLE DE CH. CRUSSARD ET J. BOUVAIST

L'article ci-dessus a été écrit à la suite d'expériences mettant en cause le comportement anormal de métaux ou alliages en présence de J.P. Girard. Je peux assurer que ces expériences ont été effectuées avec une grande rigueur scientifique, de façon à éliminer autant que possible toute tricherie ; cependant, plusieurs d'entre elles n'ont pas convaincu, car il reste toujours la possibilité d'un truquage.

Beaucoup de phénomènes sont rejetés par le monde savant parce que considérés comme irrationnels ; mais ce n'est pas faire preuve d'honnêteté scientifique que de refuser a priori de chercher à les observer et à les contrôler par soi-même, dans un souci de vérité.

Plusieurs personnalités scientifiques n'ont pas hésité à participer aux expériences de J.P. Girard, simplement pour les « voir » objectivement. J'ai eu personnellement cette occasion et j'ai été parfois troublé par ces expériences qui, comme l'a dit un de nous, nous mettent nous, physiciens, dans une situation très inconfortable.

De toutes ces expériences, la plupart enregistrées en vidéo, avec un luxe considérable de contrôles, seules ont été retenues par C. Crussard et J. Bouvaist, celles qui font l'objet de cet article. Jusqu'à preuve du contraire, il n'a pas été possible de donner une explication rationnelle des transformations observées et décrites — ce qui ne signifie naturellement pas qu'on n'en trouvera pas par la suite.

Il a paru intéressant aux auteurs de l'article de publier leurs observations, sachant bien qu'ils iraient au devant d'un scepticisme assez général — mais il ne faut voir dans leur démarche que le désir de faire connaître des phénomènes évidemment inexplicables dans l'état actuel de nos connaissances.

J'ai accepté pour ma part d'ajouter ces quelques lignes, ayant eu l'occasion de suivre d'assez près ces expériences, simplement pour donner ma caution sur la rigueur scientifique avec laquelle elles ont été conduites par les auteurs. Trop de facteurs sont encore indéterminés pour qu'il soit possible d'en donner une interprétation valable.